

Darstellung und Einfluss von durchbrochener Bewölkung auf den Ertrag von Photovoltaik-Anlagen und dessen Prognose

R. Göhler*, A. Raabe*, J. Zimmer**

**) Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig*

E-Mail: raabe@uni-leipzig.de

***) Ingenieurbüro Last- und Energiemanagement, Nordplatz 6, 04105 Leipzig*

Summary

Due to the significant increase of 'renewable energy' to the total energy the highly fluctuating energy supply, which is due to the constitutional conditions of production among others from photovoltaic systems, becomes a growing problem. As a result, many engineering firms and companies dedicate themselves to the so-called power prediction by which it should be possible to integrate a fast changing energy supply into a necessarily continuous energy supply. The Ingenieurbüro für Last- und Energiemanagement (LEM-Software) used a neural network for this prediction of performance of photovoltaic systems. This networks learn from past knowledge a mathematical pattern that can be used for forecasting. Based on this, this article deals with a new parameter for the network which characterizes the probability of broken cloud effects.

The global radiation forecast in the surrounding area is analyzed for this index. It turns out that this inhomogeneous index is a better indicator than the standard deviation. A first application shows a slight improvement in the forecast result. However, the time limit for application of the neural network is too short for a final evaluation.

Zusammenfassung

Aufgrund des steigenden Anteils 'erneuerbarer Energie' an der Energieversorgung wird die stark schwankende Energiezufuhr, bedingt durch die naturgegebenen Produktionsbedingungen unter anderem von Photovoltaik-Anlagen, zu einem immer größeren Problem. Infolge dessen widmen sich viele Ingenieurbüros und Firmen sogenannten Leistungsprognosen, mit deren Hilfe es gelingen soll, eine schnell wechselnde Energiebereitstellung in eine notwendigerweise kontinuierliche Energieversorgung zu streichen.

Das Ingenieurbüro für Last- und Energiemanagement (LEM-Software) verwendet für diese Vorhersagen der Leistung von Photovoltaik-Anlagen ein künstliches neuronales Netzwerk (KNN). Dieses erlernt aus vergangenen Verhältnissen ein mathematisches Muster, welches für die Prognose angewendet werden kann. Aufbauend darauf befasst sich dieser Artikel mit einem Inhomogenitätsindex für das Netzwerk, welcher die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten schnell wechselnder Bewölkung und von Broken-Cloud-Effekten charakterisiert.

Für den Index wird die Globalstrahlungsvorhersage in der näheren Umgebung analysiert. Dabei

stellt sich heraus, dass dieser Inhomogenitätsindex ein besserer Indikator als die Standardabweichung ist. Eine erste Anwendung zeigt eine leichte Verbesserung des Prognoseergebnisses, allerdings ist der Zeitraum für die Anwendung des KNN zu kurz für eine abschließende Bewertung.

Einleitung

Die Bereitstellung der Energie aus erneuerbaren Energieträgern gewinnt in Deutschland immer mehr an Bedeutung. Im letzten Jahrzehnt stieg die installierte Photovoltaik-Leistung sehr stark an (BP, 2015). In Folge dessen vergrößerte sich auch die Schwankung der von den Photovoltaik-Anlagen am Netz anliegenden Leistung. Diese Schwankungen, ausgelöst hauptsächlich durch wechselnde Bewölkung, stellen die Netzbetreiber, die eine kontinuierliche Stromversorgung garantieren müssen, vor Probleme.

Die Bundesrepublik Deutschland sieht die Netzbetreiber in der Pflicht, den in das Netz aus erneuerbaren Energieträgern eingespeisten Strom vorrangig abzunehmen (EEG, 2014) und den darüberhinausgehenden Bedarf durch konventionelle Energieerzeugungsarten (Kohle, Öl, Gas) abzudecken. Aus diesem Grund sind die Netzbetreiber an einer Prognose des naturgegebenen schwankenden 'Ökostromanteils' interessiert.

Ein Ziel einer solchen Leistungsprognose beispielsweise für Photovoltaikanlagen ist die Verbesserung der Vorhersagen im 'Day ahead' oder im Kurzestfristbereich. Eine Leistungsprognose kann dabei auf verschiedenen Methoden basieren. Im Ingenieurbüro für Last- und Energiemanagement wird hierfür hauptsächlich ein KNN benutzt. Dieses Netzwerk erlernt aus vergangenem Wissen ein mathematisches Muster, welches für die Vorhersage angewendet wird (Patterson, 1996; Rojas, 1996).

In diesem Bericht wird untersucht, ob eine Verbesserung der Leistungsprognose (im Day-ahead Bereich) erfolgen kann, wenn ein Index ermittelt wird, welcher die Wolkenstruktur im mesoskaligen Umfeld der Anlage repräsentiert. Genauer gesagt soll der Index den Broken-Cloud-Effekt charakterisieren, welcher die Leistung der Photovoltaik-Anlage beeinflusst. Dieser Effekt bewirkt eine Strahlungsüberhöhung an den Wolkenrändern. Aufgrund der Abschattungen durch Wolken erfolgt zusätzlich eine Verringerung der Modultemperatur und somit eine Steigerung des Wirkungsgrads. Ein numerisches Wettervorhersagemodell kann dabei keine direkte Aussage über diesen Effekt treffen.

Broken-Cloud-Effekte am Leipziger Institut für Meteorologie

Einen Überblick über die Häufigkeit des Auftretens der Broken-Cloud-Effekte und deren Energieanteil zeigt Abbildung 1 für eine Beobachtung über ein Jahr hinweg. Das obere Bild kennzeichnet das Auftreten der Broken-Cloud-Effekte des gesamten Jahres 2014 für jede Minute, außer zwischen dem 27.07.2014 und 25.09.2014, da hier die Messung aufgrund eines Blitz-

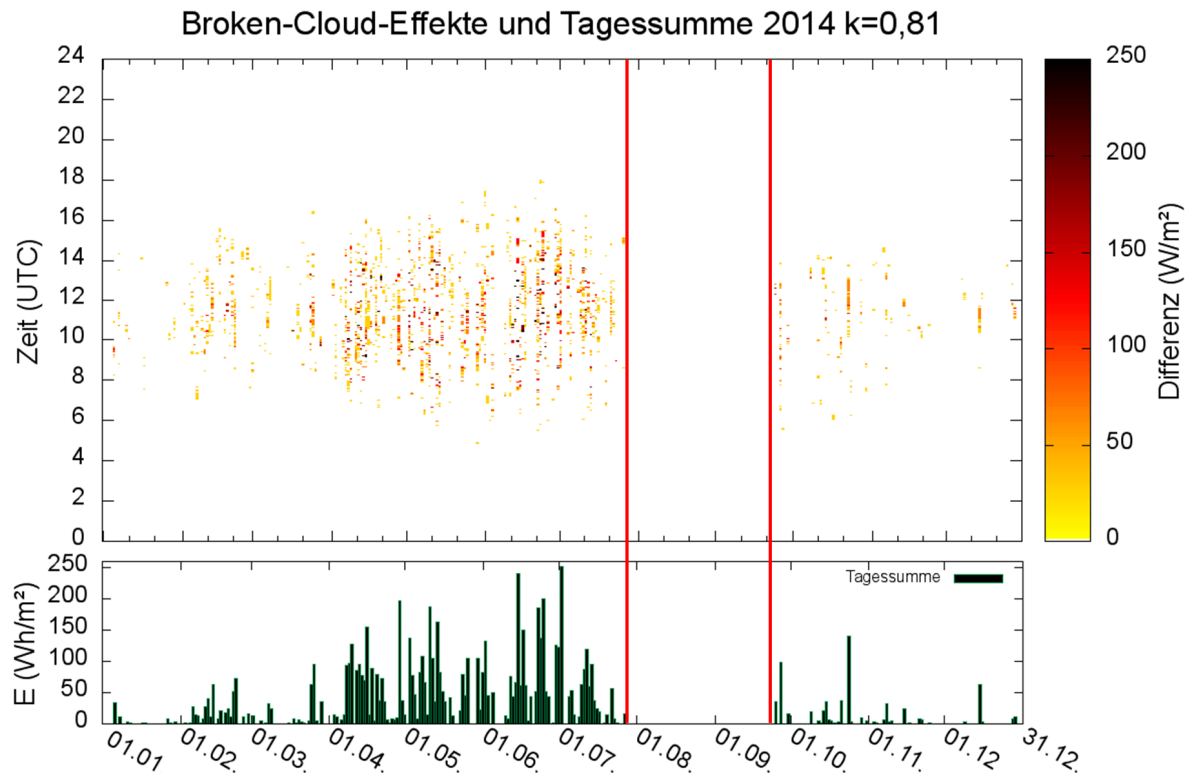


Abbildung 1: Oberes Bild: Broken-Cloud-Effekte über das Jahr 2014 für jeden Tag und jede Uhrzeit, Differenz der Strahlungsflussdichten von gemessener Q_{gem} und astronomisch maximal möglicher Globalstrahlung $Q_{ast,kor}$, Ausfall der Messungen: 27.07.2014 bis 25.09.2014 (rot markiert); Unteres Bild: Tagessumme der Energie von Broken-Cloud-Effekten.

schlages ausfiel. Auf der x-Achse ist jeder einzelne Tag aufgezeichnet. Die y-Achse zeigt die Tageszeit und die farbigen Punkte stehen für einen Broken-Cloud-Effekt, wobei hier die Differenzen dargestellt sind, welche sich aus folgender Gleichung ergeben:

$$Q_{dif} = Q_{gem} - Q_{ast,kor}. \quad (1)$$

Q_{gem} ist die gemessene Globalstrahlung am LIM. Die Berechnung der maximal möglichen Globalstrahlung $Q_{ast,kor}$ erfolgt mit der folgenden Gleichung:

$$Q_{ast,kor} = S_0 * k * \cos(\chi). \quad (2)$$

Dabei ist S_0 die Solarkonstante, χ der Sonnenhöhenwinkel und k der Korrekturfaktor. Die genauere Berechnung von χ ist in Whitman (2007) aufgezeigt.

Das Messintervall beträgt 1 Minute. Nach der Berechnung ergeben sich auch negative Werte für Q_{dif} , jedoch sind diese nicht relevant für den Broken-Cloud-Effekt und werden in der Abbildung 1 nicht dargestellt. Die gelben Farben repräsentieren eine geringe, die roten Farben eine mittelhohe und die schwarzen Farben eine sehr hohe Differenz. Das Maximum von Q_{dif} lag knapp über 400 Wm^{-2} . Da jedoch die Häufigkeit dieser großen Werte gering war, wurde eine

Intervallobergrenze von 250 Wm^{-2} gewählt. Alles was über diesem Wert liegt, ist schwarz gekennzeichnet.

Das untere Bild aus Abbildung 1 zeigt die Tagessummen der Differenzen bei Broken-Cloud-Effekten. Allerdings lassen sich die Strahlungsflussdichten nicht einfach aufsummieren. Dafür müssen diese Werte zuerst in Energie umgerechnet und dann addiert werden. Die Berechnung von der Globalstrahlung Q in die Energie E erfolgt mittels folgender Gleichung:

$$E[\text{Whm}^{-2}] = \sum_{i=1}^n \left(Q_i[\text{W/m}^{-2}] \right) * \Delta t_i. \quad (3)$$

E ist die Energie in Whm^{-2} , Q_i ist die Globalstrahlung je Sekunde in Wm^{-2} und Δt_i ist der Zeitbereich. Die Berechnung der Energie für jede Minute erfolgt, indem die Globalstrahlungswerte Q_i für jede Sekunde in der gemessenen Minute gleich bleiben und das Δt_i gleich $1/60 \text{ h}$ ist.

Insgesamt betrachtet traten witterungsbedingt die Broken-Cloud-Effekte besonders häufig im Frühjahr und Sommer auf. Vor allem die Differenzen zeigen zwischen Ende April bis Ende Juli sehr hohe Werte, was an der höheren Globalstrahlung liegt, denn je höher diese ist, desto mehr kann sie an den Wolken gestreut und reflektiert werden. Diese erhöhten Werte spiegeln sich auch in der Energie wider. Im Winter und Herbst nahm die Häufigkeit deutlich ab. Jedoch unterliegt das Auftreten von Broken-Cloud-Effekten vor allem dem Wetter. Deswegen waren die Bedingungen für Strahlungsüberhöhungen im Frühjahr und Sommer sehr gut, im Herbst und Winter hingegen weniger optimal.

Des Weiteren können Broken-Cloud-Effekte, welche durch gut transmittierende, hohe Wolken (Cirrus) verringerte Werte annehmen, nicht analysiert werden. Jedoch sind in Abbildung 1 einzelne Tage dargestellt, wo Strahlungsüberhöhungen scheinbar sehr lange anhalten. Dies liegt an der Berechnung der astronomisch maximal möglichen Globalstrahlung $Q_{ast,kor}$. Der Korrekturfaktor k wurde so gewählt, dass möglichst viele Broken-Cloud-Effekte zu sehen sind. Jedoch treten einzelne trockene, mit wenig Aerosol belastete sonnige Tage auf, die den hier berechneten Grenzwert von $Q_{ast,kor}$ übersteigen. Dann entstehen in Abbildung 1 durchgehende Linien, die zum Ausdruck bringen, dass scheinbar ununterbrochen Broken-Cloud-Effekte auftraten.

Einfluss der Modultemperatur

Die Modultemperatur besitzt einen großen Einfluss auf die Leistung einer Photovoltaik-Anlage. Dabei gilt, dass der Wirkungsgrad um bis zu $-0,5 \text{ \%K}^{-1}$ fällt (Mertens, 2013; Kaltschmitt u. a., 2013). Dies bedeutet, je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist der Wirkungsgrad. Zehner u. a. (2010) haben die Temperatur des Moduls gegen die Globalstrahlung aufgetragen. Das Gleiche wird in diesem Abschnitt für eine Photovoltaik-Anlage gemacht, welche die Modulstrahlung, Leistung und Modultemperatur liefert. Die Modulstrahlung ist die Strahlungsflussdichte, welche an dem meist geneigten Solar-Modulen auftritt. In Abbildung 2 (a) ist die Temperatur am Modul auf der x-Achse und die gemessene Strahlungsflussdichte auf der y-Achse aufgetragen. In schwarze Kreuze gekennzeichnet ist der 02.07.2015, ein sonniger Tag, in graue Punkte

der 09.07.2015, ein wechselhafter Tag. An dem wolkenlosen Tag steigt sowohl die Modul-

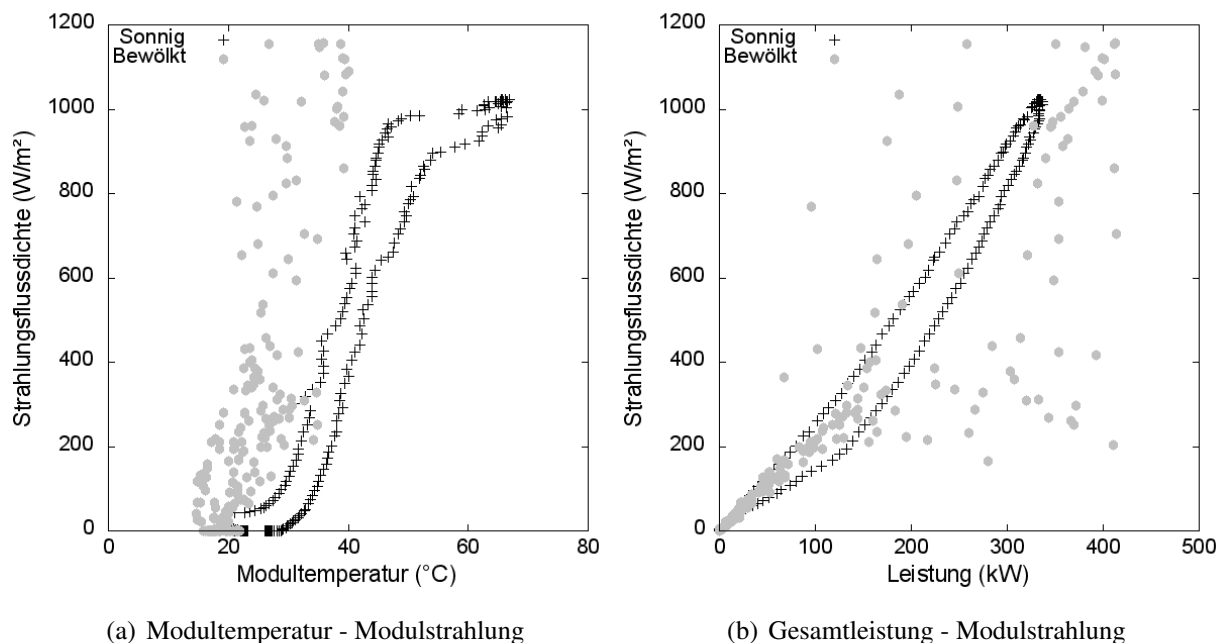


Abbildung 2: Gegenüberstellung von Modultemperatur und Gesamtleistung der Photovoltaik-Anlage in Böhlen mit der Modulstrahlung an einem sonnigen Tag (02.07.2015) und durchbrochen bewölkten Tag (09.07.2015); (a) Modultemperatur - Modulstrahlung; (b) Gesamtleistung - Modulstrahlung.

strahlung als auch die Modultemperatur deutlich an und erreicht mehr als 60 °C. Aufgrund der Abkühlung der Solarmodule in der Nacht werden am Vormittag niedrigere Modultemperaturen bei gleicher Modulstrahlung erreicht als am Nachmittag.

Die grauen Punkte zeigen, wie das Bild an einem Tag mit durchbrochener Bewölkung aussieht. In diesem Fall wird kein klarer Verlauf deutlich. Dennoch wird ersichtlich, dass die Modultemperatur ihr Maximum bei circa 40 °C erreicht und somit geringer ist als an einem sonnigen Tag. Zusätzlich liegen die Strahlungsflussdichten teilweise höher, was hier auf den Broken-Cloud-Effekt zurückgeführt wird. Es ergibt sich der gleiche Effekt wie bei Zehner u. a. (2010). Dementsprechend müssen an einem Tag mit vielen Broken-Cloud-Effekten höhere Leistungen auftreten als an einem sonnigen Tag. Dies geht aus b) der Abbildung 2 hervor. Hier sind die Darstellungseigenschaften die Gleichen wie im Fall (a). Die Leistung ist auf der x-Achse in kW angegeben und stellt die gesamte Summe der Wechselrichter der Photovoltaik-Anlage dar. Der sonnige Tag (schwarz) zeigt einen klaren Verlauf. Dabei steigt sowohl die Leistung als auch die Modulstrahlung linear an. Der untere Ast der Punktwolke charakterisiert den Vormittag. Dies liegt an der niedrigeren Modultemperatur und dem damit ansteigenden Wirkungsgrad der Solarmodule. An einem bewölkten Tag (grau) zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Punkte sind unregelmäßig verteilt. Im Vergleich zu dem sonnigen Tag liegen die Leistungen bei gleicher Modultemperatur höher. Der Grund ist, dass die wechselnde Bewölkung dazu führt, dass sich die Module abkühlen können und somit einen höheren Wirkungsgrad erreichen (verglei-

che Abbildung 2 (a)). Hinzu kommen noch kurzzeitige Strahlungsüberhöhungen durch Broken-Cloud-Effekte, welche zu einer erhöhten Leistung an den Anlagen führen. So treten kurzzeitig Leistungen bis 400 kW auf, die an dem sonnigen Tag überhaupt nicht erreicht werden.

Es bleibt festzuhalten, dass die produzierte Leistung der Photovoltaik-Anlagen an einem bewölkten Tag kleiner ist als an einem sonnigen Tag. Tatsächlich jedoch ist der Leistungsverlust durch die Wolken nicht so groß wie erwartet, denn die Modultemperatur bleibt durch die kurzzeitigen Abkühlungen durch Schattenphasen auf einem niedrigeren Niveau im Vergleich zu einem wolkenlosen Fall.

Inhomogenitätsindex

Wünschenswert wäre eine Information, zum Beispiel aus einer Wetterprognose, die etwas über das Auftreten solcher schnell wechselnden Bewölkung zusammen mit Broken-Cloud-Effekten aussagt. Um die Wahrscheinlichkeit für einen Broken-Cloud-Effekt darzustellen wird ein Inhomogenitätsindex berechnet. Dafür wird das numerische Wettervorhersagemodell WRF genutzt, welches eine Gitterbreite von vier Kilometern aufweist (Skamarock u. a., 2008). Es werden insgesamt 81 Gitterpunkte betrachtet, so dass sich eine Umgebung von 32 x 32 km ergibt. Der Inhomogenitätsindex ergibt sich nun aus den Globalstrahlungsvorhersagewerten der umliegenden Gitterpunkten, mit jeweils einer Globalstrahlungsvorhersage. In Abbildung 3 sind die um

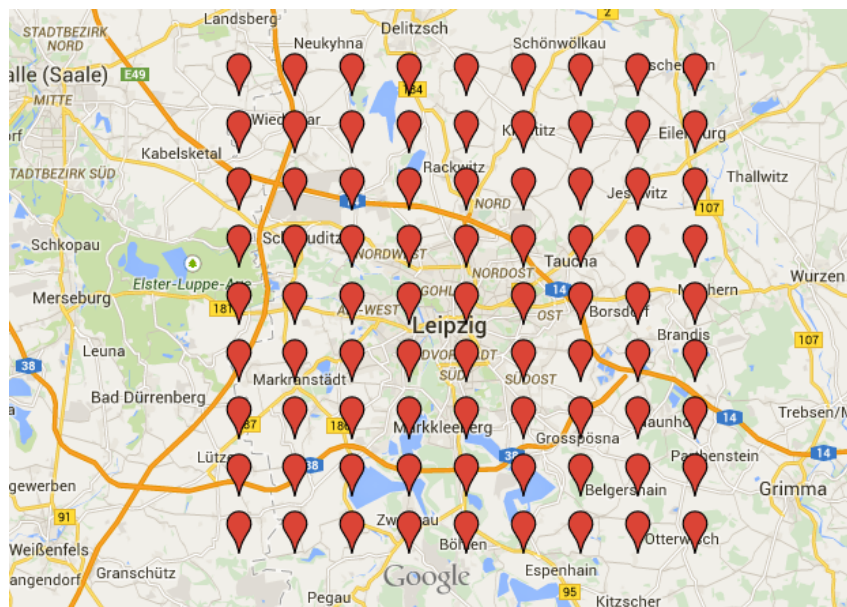


Abbildung 3: 32 x 32 km Gitternetz über Leipzig des WRF-Modells

Leipzig liegenden Gitterpunkten dargestellt.

Zunächst wird von den 81 Gitterpunkten der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt. Wie später gezeigt wird, reicht die Aussagekraft der Standardabweichung nicht aus. Deswegen wurde zusätzlich ein Index entwickelt, der die Broken-Cloud-Effekte besser beschreiben kann als die Standardabweichung.

Der Inhomogenitätsindex ergibt sich aus der Summe der Absolutwerte der Differenz zwischen den benachbarten Gitterpunkten der Globalstrahlungsvorhersagewerte. Um diesen Index genauer zu beschreiben, ist in Abbildung 4 ein 3 x 3 Gitterpunkt-Modell dargestellt. Bei dieser

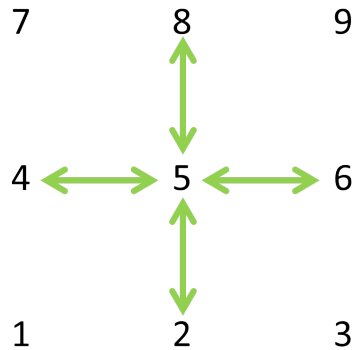


Abbildung 4: Beispiel für die Berechnung des Inhomogenitätsindex anhand eines 3 x 3 Gitterpunkt-Modells; die grünen Pfeile stellen die jeweilige Berechnungsbeziehung dar.

Rechnung können die Randwerte nicht ermittelt werden. Es wird in Abbildung 4 deutlich, dass es für dieses Beispiel nur einen Inhomogenitätsindexwert gibt, den des fünften Gitterpunktes. Gleichung 5 zeigt die Berechnung dieses Wertes.

$$II_5 = |Q_{rad}(5) - Q_{rad}(2)| + |Q_{rad}(5) - Q_{rad}(4)| + |Q_{rad}(5) - Q_{rad}(6)| + |Q_{rad}(5) - Q_{rad}(8)| \quad (5)$$

II_5 ist der Inhomogenitätsindexwert vom fünften Gitterpunkt und $Q_{rad}(i)$ sind die Globalstrahlungsvorhersagewerte vom i -ten Gitterpunkt. Das bedeutet, dass die Summe der Beträge der Differenzen zwischen dem Gitterpunkt i und den benachbarten Gitterpunkten den Inhomogenitätsindex für den Gitterpunkt i ergeben.

In diesem Bericht wird ein 9 x 9 Gittermodell genutzt. Hierfür wird eine allgemeine Formel zur Berechnung benötigt. Mit der Berücksichtigung der Randwertproblematik ergeben sich aus diesem Fall 49 Inhomogenitätswerte. Diese können mit der allgemeinen Gleichung 6 für das 9 x 9 Gittermodell berechnet werden.

$$II_i = |Q_{rad}(i) - Q_{rad}(i+1)| + |Q_{rad}(i) - Q_{rad}(i-1)| + |Q_{rad}(i) - Q_{rad}(i+9)| + |Q_{rad}(i) - Q_{rad}(i-9)| \quad (6)$$

Aus diesen 49 Werten wird ein Mittelwert gebildet. Daraus ergibt sich der Inhomogenitätsindex für das betrachtete Gitterpunkt-Modell.

Im weiteren Verlauf wird die Wahrscheinlichkeit der Broken-Cloud-Effekte mit Hilfe dieses Indexes quantifiziert. Es ist wichtig zu wissen, dass die Aussagekraft des Wertes von der Qualität der Globalstrahlungsvorhersage abhängig ist.

Unterschied zwischen Inhomogenitätsindex und Standardabweichung

Um die Leistungsprognose für die Photovoltaik-Anlagen zu verbessern, wird dieser Inhomogenitätsindex, welcher die Wahrscheinlichkeit für einen Broken-Cloud-Effekt darstellen soll, für das KNN eingesetzt. Doch warum reicht nicht allein die Standardabweichung? Diese Frage soll anhand zweier Beispiele geklärt werden. Das Problem hierbei ist, dass die Standardabweichung den gesamten Raum betrachtet und nicht direkt die Struktur des Messraumes, was anhand der zwei folgenden Beispiele verdeutlicht werden soll.

Bei dem ersten Ereignis muss die Globalstrahlungsvorhersage stark fluktuieren, wohingegen sie bei dem zweiten Ereignis auf der einen Seite des Gitterpunkt-Modells sehr niedrig und auf der anderen sehr hoch beziehungsweise umgekehrt sein muss. Für das zweite Ereignis bietet sich der Durchzug einer Wolkenfront an.

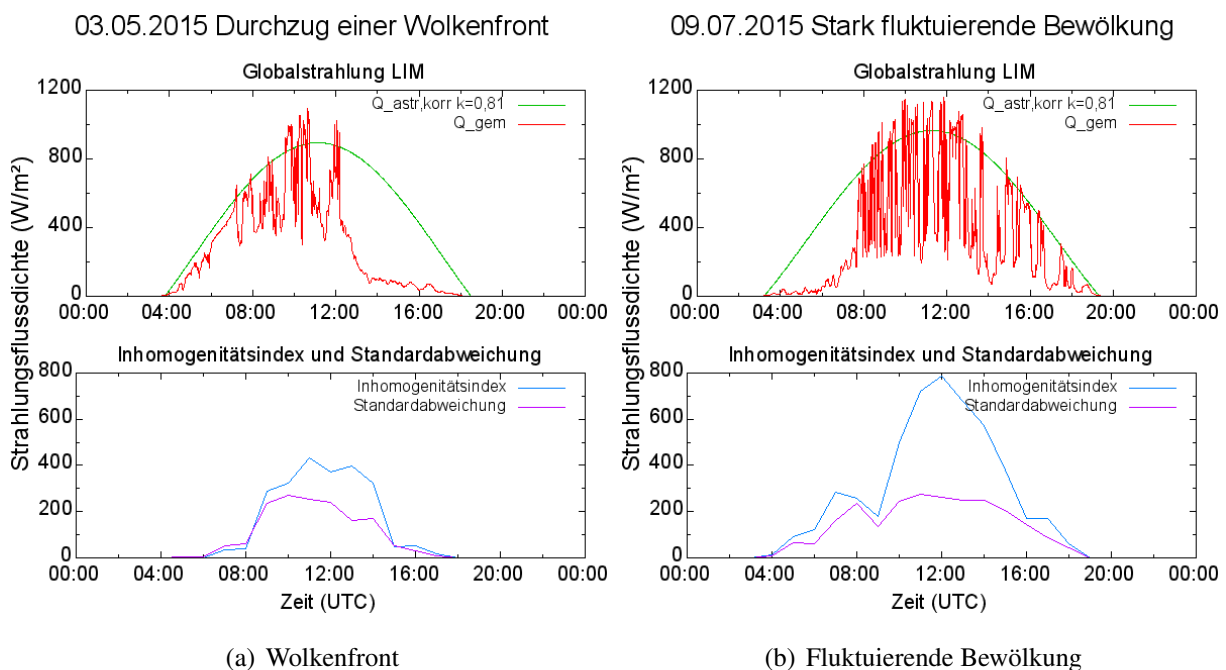


Abbildung 5: Gemessene Globalstrahlung am LIM (rot) und berechnete astronomisch maximal mögliche Globalstrahlung $Q_{ast,kor}$ (grün); prognostisch berechneter Inhomogenitätsindex (blau) sowie die Standardabweichung (violett); (a) 03.05.2015 Durchzug einer Wolkenfront; (b) 09.07.2015 stark fluktuierende Bewölkung.

In Abbildung 5 ist die Globalstrahlungsmessung vom LIM (rot), die berechnete astronomisch maximal mögliche Globalstrahlung $Q_{ast,kor}$ (grün) und der prognostisch berechnete Inhomogenitätsindex (blau) und Standardabweichung (violett) vom 03.05.2015 (links) und 09.07.2015 (rechts) dargestellt. Im Beispiel (a) kam es zu einem Durchzug einer Wolkenfront und im Fall (b) zu einer starken fluktuierenden Bewölkung. Anhand dieser beiden Tage ist gut zu erkennen, dass die Standardabweichung alleine nicht ausreicht, um die Broken-Cloud-Effekte zu klassifizieren, da sie bei beiden Tagen gleich hohe Werte aufweist.

Im Fall (a) fluktuiert die Globalstrahlung am Vormittag und es treten einzelne Broken-Cloud-Effekte auf, welche mit Hilfe der Darstellung von der astronomisch maximal möglichen Globalstrahlung (grün) leicht zu identifizieren sind. An diesem Tag lag ein Tief über den Britischen Inseln und dessen Warmfront zog direkt über Leipzig. Am Nachmittag kam es zum Durchzug dieser Wolkenfront, was gut an der Verringerung der gemessenen Strahlungsflussdichte für diesen Zeitpunkt zu erkennen ist. Danach blieb die Globalstrahlung auf einem niedrigen Niveau. Der Inhomogenitätsindex und die Standardabweichung zeigen in diesem Zeitraum recht hohe Werte an, wobei beide Werte nah beieinander liegen.

Ein anderes Bild zeigt sich am 09.07.2015 (Abbildung 5 (b)). In diesem Fall lag ein Tiefdruckgebiet über Dänemark und dessen Kaltfront zog über Leipzig. Anschließend bildeten sich in der feucht-labilen Luft tiefe Cumuluswolken, welche zu vielen Broken-Cloud-Ereignissen führten. Dies ist gut in Abbildung 5 (b) zu sehen. Die Globalstrahlung (rot) zeigt von 8 bis 18 UTC Schwankungen mit vielen Strahlungsüberhöhungen. Die Standardabweichung zeigt an diesem Tag fast die gleichen Werte wie am 03.05.2015. Der Inhomogenitätsindex schlägt jedoch deutlich weiter aus und erreicht in diesem Fall fast das Doppelte, verglichen zu Fall (a). Anhand dieser zwei Fälle wird ersichtlich, dass der Index eine bessere Klassifizierung für die Broken-Cloud-Effekte ermöglicht als die Standardabweichung.

Um dies noch besser zu zeigen, wurde die Verteilung der prognostizierten Globalstrahlungswerte für das Gitterpunktmodell für einen bestimmten Zeitpunkt beider Tage erstellt. Dies ist in der Abbildung 6 dargestellt. In der linken Bildhälfte ist der 03.05.2015 10 UTC und in der rechten Bildhälfte der 09.07.2015 12 UTC abgebildet. Die Verteilung der Globalstrahlung zeigt,

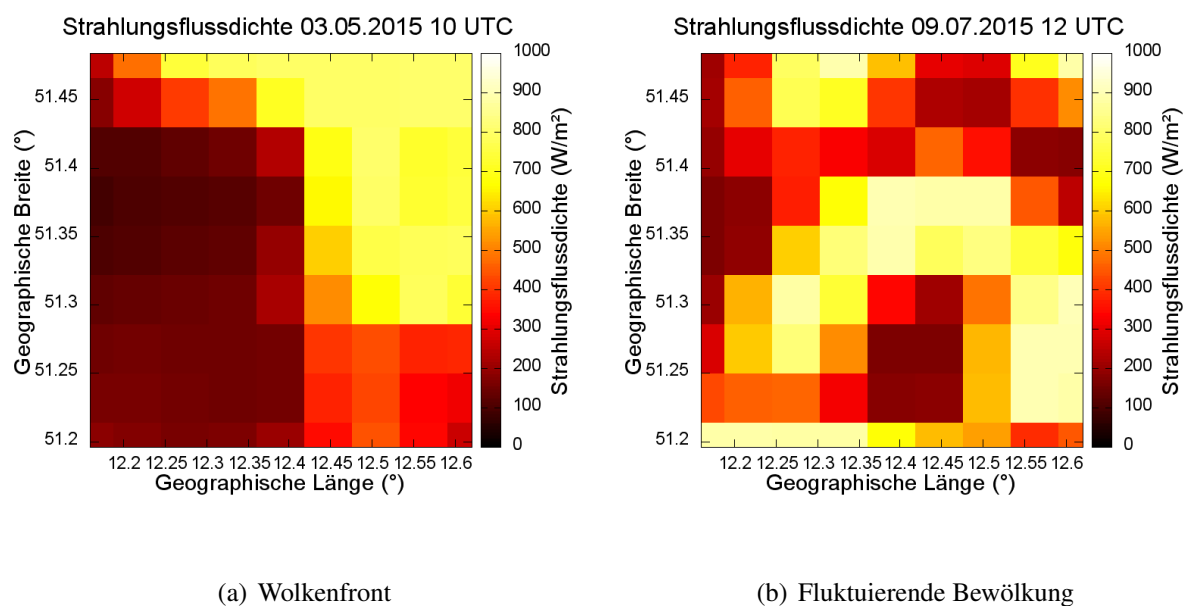


Abbildung 6: Strahlungsflussdichtevorhersageverteilung in dem 9×9 Gitterpunkt-Modell des WRF; (a) 03.05.2015 10 UTC Durchzug einer Wolkenfront; (b) 09.07.2015 12 UTC stark fluktuierende Bewölkung.

dass am 03.05.2015 im Südwesten sehr geringe und im Nordosten sehr hohe Strahlungsflussdichten prognostiziert wurden (Abbildung 6 (a)). Dies liegt am Durchzug der Wolkenfront. Am 09.07.2015 12 UTC (Abbildung 6 (b)) sieht die Globalstrahlungsverteilung deutlich anders aus. In diesem Fall liegen die hohen und niedrigen Strahlungsflussdichten weit verteilt über dem gesamten Gitterpunktmodell.

Beim Vergleich der Standardabweichung aus Abbildung 5 (a) und (b) fällt auf, dass Diese am 03.05.2015 10 UTC und am 09.07.2015 12 UTC fast identische Werte aufweisen. Beim Inhomogenitätsindex hingegen wurden am 03.05.2015 10 UTC Strahlungsflussdichten von 400 Wm^{-2} und am 09.07.2015 12 UTC von knapp 800 Wm^{-2} berechnet. Diese Differenz zeigt, dass der Inhomogenitätsindex in der Lage ist, den Broken-Cloud-Effekt besser zu charakterisieren als die Standardabweichung.

Begutachtung des Inhomogenitätsindex gegenüber der Globalstrahlung am LIM

In diesem Abschnitt wird der Inhomogenitätsindex gegenüber der Globalstrahlung am LIM verglichen. In Abbildung 7 sind die Messwerte vom LIM und die Prognosen des WRF dargestellt. Betrachtet wird der Zeitraum vom 02. bis 09.07.2015. In diesem Zeitbereich erfolgten sowohl

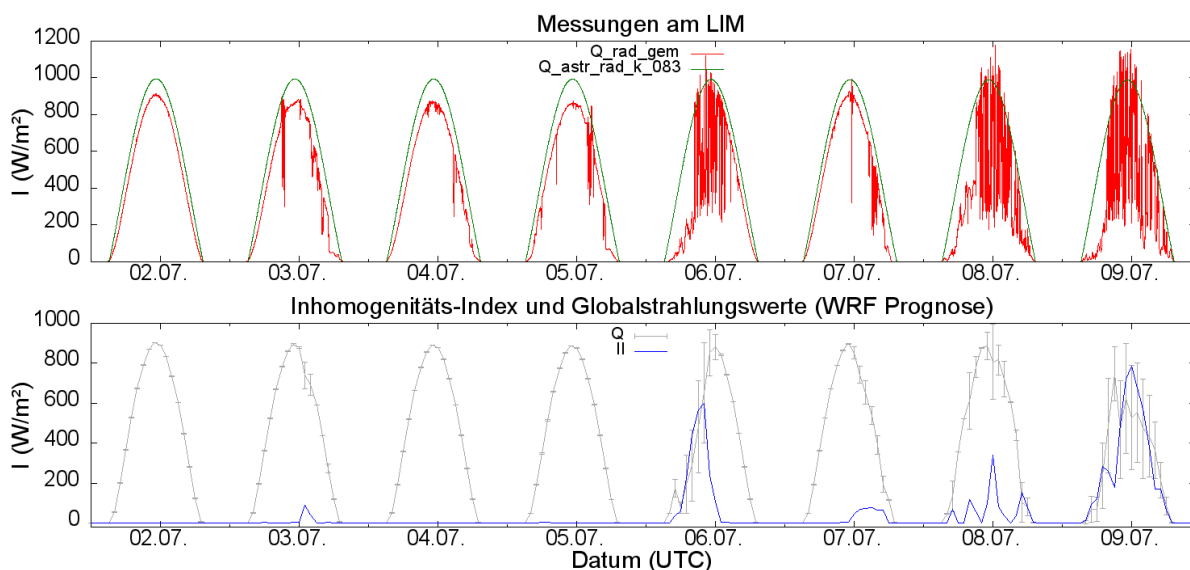


Abbildung 7: obere Ebene: gemessene Globalstrahlung am LIM (rot), astronomisch maximal mögliche Globalstrahlung (grün); untere Ebene: Globalstrahlungsvorhersagewerte mit Standardabweichung als Fehlerbalken (grau), Inhomogenitätsindex (blau)

Broken-Cloud-Effekte als auch sonnige Tage. Die obere Abbildung zeigt die Globalstrahlung am LIM in rot und die astronomisch maximal mögliche Globalstrahlung in grün. Gut erkennbar sind dabei die Tage mit Broken-Cloud-Effekten, wie zum Beispiel am 06., 08. und 09.07.2015. Das untere Bild stellt die Vorhersagewerte da. Dies umfasst zum einen die Globalstrahlungsvorhersage vom Gitterpunkt in Leipzig, welche in grau gekennzeichnet ist. Zusätzlich ist diese

Funktion mit Fehlerbalken ausgestattet, welche die Standardabweichung von den gesamten 81 Globalstrahlungswerten darstellt. In blau gekennzeichnet ist der Inhomogenitätsindex.

An den sonnigen Tagen, dem 02. und 04.07.2015 schien die Sonne fast ungehindert, was gut erkennbar an der gemessenen Globalstrahlungskurve vom LIM zu sehen ist. Die Prognose zeigt sehr hohe Globalstrahlungswerte und der Inhomogenitätsindex liegt um 0 Wm^{-2} .

Der wichtigere Punkt sind die Ereignisse mit Broken-Cloud-Effekt, wie am 09.07.2015. Dabei ergab sich ein sehr hoher Inhomogenitätsindex mit fast 800 Wm^{-2} um 12 UTC. Und die hohen Werte spiegeln den gemessenen Globalstrahlungsverlauf gut wider. Es gibt jedoch auch Tage, wo der Inhomogenitätsindex keine hohen Werte aufweist und dennoch Broken-Cloud-Effekte auftreten, wie zum Beispiel am 08.07.2015. Hierbei muss gesagt werden, dass der Index von der Prognose abhängig ist und zusätzlich nur die Wahrscheinlichkeit darstellt.

Testläufe mit dem neuronalen Netzwerk

Der neue Index kennzeichnet eine gute Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit für einen Broken-Cloud-Effekt, was mittels einzelner Fallstudien zu erkennen war. Aus diesem Grund soll der Inhomogenitätsindex als neuer Parameter im KNN verwendet werden.

Für die Auswertung müssen Daten von einer Photovoltaik-Anlage vorhanden sein. Hierfür wurden die normierten Leistungsdaten von einem Photovoltaik-Park, welcher in der Nähe von Leipzig liegt, genommen. Dabei handelt es sich um einen Datensatz, welcher vom 01.05.2015 bis 22.10.2015 reicht.

Um die Prognose mit dem neuen Inhomogenitätsindex vergleichen zu können, wurden zwei KNN-Testläufe gemacht. Die erste Variante läuft mit dem Index, die zweite Variante ohne. In Abbildung 8 ist der Vergleich zwischen den Simulationen mit Inhomogenitätsindex (rote Linie), ohne Inhomogenitätsindex (blaue Linie) sowie die reale normierte Leistung (graue Linie) dargestellt. Der ausgewählte Zeitraum zeigt den selben Zeitbereich wie in Abbildung 7.

An den komplett sonnigen Tagen (02.07.2015 und 04.07.2015) ergaben sich erste Differenzen zwischen den beiden Prognosen. Die Vorhersage mit Inhomogenitätsindex (rot) zeigt einen besseren Verlauf als die ohne Index (blau). Hierbei handelt es sich um einen sekundären Effekt. Das bedeutet, dass sogar eine Verbesserung der neuen Prognose stattfindet, wenn der Inhomogenitätsindex niedrig ist. Zunächst wurde nur eine bessere Vorhersage bei den Fällen mit Broken-Cloud-Effekten erwartet. Theoretisch ist jedoch das KNN in der Lage, aus den niedrigen Inhomogenitätswerten und hohen Globalstrahlungswerten einen sicheren sonnigen Tag zu prognostizieren, so dass die prognostizierten Leistungen höhere Werte annehmen als ohne den Inhomogenitätsindex. Der Grund dafür liegt darin, dass die lokale Fluktuation ein Indiz für die Wahrscheinlichkeit der Vorhersage ist.

Am 03.07.2015 und 05.07.2015 scheint die neue Vorhersage schlechter gegenüber den Realwerten (graue Linie) abzuschneiden als die alte Vorhersage (blaue Linie). Dennoch zeigte sich der Inhomogenitätsindex an diesen Tagen wieder nahe Null, welcher gut in Abbildung 7 zu

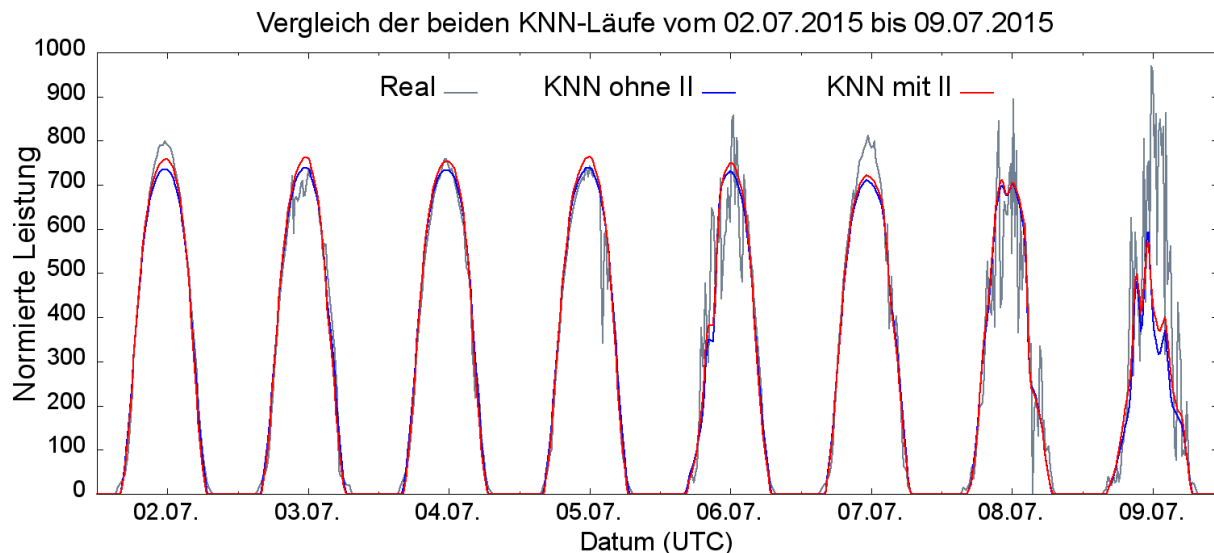


Abbildung 8: Vergleich des KNN mit neuem Parameter (rote Linie) und ohne neuem Parameter (blaue Linie) und der realen Leistung (graue Linie) vom 02.07.2015 bis 09.07.2015

sehen ist. Die neue Prognose stellte einen Verlauf mit höheren Leistungs- als Realwerten dar. Jedoch kam es am 03.07.2015 zur Wolkenbildung, welche in der Vorhersage des WRF-Modells unterschätzt wurde. Aus diesem Grund verläuft die Vorhersage der ersten Variante (mit Inhomogenitätsindex, rote Linie) höher als die der zweiten Variante (blaue Linie) und die Realwerte (graue Linie). Am 05.07.2015 schien bis zum Nachmittag ununterbrochen die Sonne und dennoch ergaben sich keine höheren gemessenen Leistungen, was an der feuchteren Luftmasse liegen kann, welche die Extinktion der Atmosphäre erhöht und für eine Minderung der Globalstrahlung verantwortlich sein kann.

Interessanter wird es am 06.07.2015. An diesem Tag kam es zu einzelnen Broken-Cloud-Effekten, bei denen die Hoffnung besteht, dass die Prognose mit dem neuen Inhomogenitätsindex eine Verbesserung zeigt. Der Inhomogenitätsindex stellt in Abbildung 7 einen starken Anstieg am Vormittag und einen Abfall gegen Nachmittag dar. Zunächst sei gesagt, dass die Prognose für diesen Tag nicht optimal war, da ab dem Mittag keine Wolken vom WRF-Modell vorhergesagt wurden, diese jedoch bis zum Nachmittag präsent waren, wie anhand der Globalstrahlung vom LIM (Abbildung 7) zu sehen ist. Dennoch zeigt sich, dass die Vorhersage mit dem Inhomogenitätsindex (rote Linie) am Vormittag besser abschneidet als die ohne (blaue Linie). Andererseits weist die neue Prognose zum Nachmittag hin teilweise erneut zu hohe Werte auf, was nicht gänzlich falsch aber dennoch nicht vergleichbar ist, da die Vorhersage einen klaren sonnigen Verlauf ab dem Mittag annimmt, die realen Werte (graue Linie) jedoch nicht.

Der 08.07.2015 und 09.07.2015 waren Tage mit durchbrochener Bewölkung. Der Inhomogenitätsindex zeigt vor allem am 09.07.2015 Werte um 800 Wm^{-2} am Mittag (siehe Abbildung 7). Am 08.07.2015 sind auch einzelne Ausschläge zu erkennen, die jedoch maximale Werte von 400 Wm^{-2} aufweisen. Beim Vergleich der beiden Prognosen (rote/blaue Linie in Abbildung 8)

zeigt sich, dass an diesem Tag die Unterschiede zwischen diesen beiden Prognosen nicht groß sind. Die größeren Abweichungen sind am 09.07.2015 besonders am Mittag erkennbar, wenn der Inhomogenitätsindex sehr hoch ist. In diesem Fall ist die WRF-Globalstrahlungsvorhersage sehr gut. Die neue Prognose mit dem KNN (rote Linie) zeigt besonders am Nachmittag deutlich bessere Werte als die alte Prognose (blaue Linie). Lediglich am Vormittag schneidet der KNN-Lauf mit dem neuem Parameter etwas schlechter ab. Insgesamt repräsentiert die neue Vorhersage mit dem Inhomogenitätsindex für diese Beispieltage eine leicht verbesserte Prognose.

Für den gesamten Zeitraum vom 01.05.2015 bis 20.10.2015 erfolgte eine Auswertung zwischen den beiden Prognosen gegenüber den Realwerten. Dabei ergab sich eine rund einprozentige Verbesserung der Vorhersage mit Parameter gegenüber der Vorhersage ohne den Parameter, bezogen auf den ursprünglichen Fehlerwert. Dies ist keine signifikante Verbesserung, dennoch ergibt sich mit Hilfe dieses Inhomogenitätsindex eine bessere Prognose.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Leistungsprognose von Photovoltaik-Anlagen spielt in Deutschland eine immer wichtigere Rolle. Im Sinne einer Verbesserung dieser Vorhersagen wurde dies in diesem Bericht erreicht, indem der Broken-Cloud-Effekt parametrisiert wurde. Hierzu wurde ein Inhomogenitätsindex entwickelt. Dieser ergibt sich aus der Umgebung der Globalstrahlungsvorhersagewerte. Der Inhomogenitätsindex gibt dabei an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Broken-Cloud-Effekt oder auch nur eine stark wechselhafte Bewölkung auftritt. Mit diesem Index konnte das KNN eine Verbindung zwischen der Vorhersage und dem Index ermitteln. Interessant war der sekundäre Effekt, welcher bei sonnigen Tagen entstand. Insgesamt wurde eine leichte Verbesserung von 1 % relativ gegenüber der Prognose ohne den Inhomogenitätsindex erreicht.

Für den Ausblick könnte eine bessere Modellauflösung zu einem noch besseren Ergebnis führen. Zusätzlich könnte es auch ein positiver Effekt sein, wenn der Trainingszeitraum für das KNN erweitert würde. Andere Varianten, die nicht an eine numerische Wettervorhersage gebunden sind, wie Analysen von Sky-Imagern oder Satellitenbilder (Deneke u. a., 2009), den Broken-Cloud-Effekten oder auch den Einfluss schnell wechselnder Bewölkung zu prognostizieren, sind für die Kurzzeitprognose (15 oder 30 Minuten) denkbar.

Literatur

- [BP 2015] BP: *BP statistical review of world energy June 2015*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>. Version: 2015
- [Deneke u. a. 2009] DENEKE, H. M. ; KNAP, W. H. ; SIMMER, C.: Multiresolution analysis of the temporal variance and correlation of transmittance and reflectance of an atmospheric column. In: *Journal of Geophysical Research* (2009), S. D17206. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011680>. – DOI 10.1029/2008JD011680
- [EEG 2014] EEG, Bundesministerium für Wirtschaft und E.: *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014)*. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf. Version: 2014
- [Göhler 2015] GÖHLER, R.: *Darstellung und Einfluss von durchbrochener Bewölkung auf den Ertrag von Photovoltaik-Anlagen und dessen Prognose*, University of Leipzig, Masterarbeit, 2015
- [Kaltschmitt u. a. 2013] KALTSCHMITT, M. ; STREICHER, W. ; WIESE, A.: *Erneuerbare Energie -Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2013
- [Mertens 2013] MERTENS, K.: *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis*. Carl Hander Verlag München, 2013
- [Patterson 1996] PATTERSON, D.: *Künstliche neuronale Netze - Das Lehrbuch*. Prentice Hall Verlag, 1996. – ISBN 3827295319
- [Rojas 1996] ROJAS, R.: *Neural Networks - A Systematic Introduction*. Springer Verlag, 1996 http://www.inf.fu-berlin.de/inst/ag-ki/rojas_home/documents/1996/NeuralNetworks/neuron.pdf
- [Skamarock u. a. 2008] SKAMAROCK, W. C. ; KLEMP, J. B. ; DUDHIA, J. ; GILL, D. O. ; BARKER, D. M. ; G., Duda M. ; X.-Y., Huang ; W., Wang ; G., Powers J.: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. In: *NCAR/TN-475+STR* (2008), S. 113 pp.
- [Whitman 2007] WHITMAN, A. M.: A Simple Expression of the Equation of Time. In: *Journal Of the North American Sundial Society* 14 (2007), S. 29–33
- [Zehner u. a. 2010] ZEHNER, M. ; WEIGL, T. ; WEIZENBECK, J. ; MAYER, B. ; WIRTH, G. ; PROCHASKA, H. ; GEISLER, B. ; GOTTSCHALG, R. ; BECKER, G. ; MAYER, O.: *Systematische Untersuchung und Auswertung meteorologischer Einstrahlungsereignisse*. Hochschule München, 2010